

VARIABILITAS MUSIMAN KOEFISIEN ABSORPSI CAHAYA PADA PERMUKAAN AIR LAUT

SEASONAL VARIABILITY OF LIGHT ABSORPTION COEFFICIENT OF SURFACE WATER

Bisman Nababan^{1*}, Denny A. Wiguna², dan Risti E. Arhatin¹

¹Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB, Bogor

²PT. Tata Hampan Eka Persada, Pangkal Pinang, Bangka-Belitung

*Email: bisman@ipb.ac.id

ABSTRACT

Absorption coefficient measurement can be used in estimating water quality, optical characteristic of water column, and marine bio-optical models. The purposes of this research were to determine values and variability of sea surface absorption coefficient in the northeastern Gulf of Mexico (NEGOM) based on various seasons. The data were collected in spring, summer, and fall seasons in 1999-2000 with AC-9 instrument. The spatial distribution of absorption coefficient showed that relatively high values were generally found along the run off Mississippi, Mobile, Chochawati, Escambia, Apalachicola, and Suwannee rivers, as well as Tampa Bay. Meanwhile, relatively low values were found in offshore region. This pattern followed the distribution pattern of chlorophyll and CDOM. Based on the local region comparison of spectral average value of absorption coefficient, we found a significant difference ($\alpha = 95\%$) among regions with the highest value in the run off of the Mississippi and Mobile rivers, and the lowest value in the offshore region. Comparison of spectral average value of absorption coefficient among seasons at the three primary wavelengths (blue=440 nm, green=510 nm, and red=676 nm) also showed a significant difference ($\alpha = 95\%$) with the highest value during the summer 1999 (Su-99) and the lowest value during the spring of 2000 (Sp-00). Absorption coefficient values were influenced by oceanographic factors that varied in every season such as wind, surface currents, upwelling, the location and speed of the Loop Current, and the river discharge of fresh water into the NEGOM.

Keywords: *absorption coefficient, seasons, chlorophyll, CDOM, northeastern Gulf of Mexico*

ABSTRAK

Pengukuran koefisien absorpsi permukaan air laut dapat berguna dalam memperkirakan kualitas perairan, karakteristik optik perairan, dan pemodelan bio-optik kelautan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai dan variabilitas koefisien absorpsi permukaan air laut di perairan timur laut Teluk Meksiko pada berbagai musim. Penelitian dilakukan pada tiga musim (semi, panas, gugur) tahun 1999-2000 dengan menggunakan instrumen AC-9. Pola distribusi spasial nilai koefisien absorpsi secara umum relatif tinggi di sekitar *run off* sungai Mississippi, Mobile, Chochawati, Escambia, Apalachicola, dan Suwannee, serta Tampa Bay, kemudian relatif rendah di sekitar wilayah *offshore*. Akan tetapi, nilai koefisien absorpsi yang relatif tinggi pada musim panas (Su-99 dan Su-00) juga menyebar hingga laut lepas. Pola distribusi koefisien absorpsi ini mengikuti pola distribusi klorofil dan CDOM. Nilai spektral rata-rata koefisien absorpsi antar wilayah lokal pengamatan ditemukan berbeda nyata ($\alpha=95\%$) dimana nilai rata-rata koefisien absorpsi paling tinggi ditemui di wilayah *run off* sungai Mississippi dan Mobile dan paling rendah di laut lepas. Nilai spektral rata-rata koefisien absorpsi antar musim pada tiga panjang gelombang utama (biru=440 nm, hijau=510 nm, dan merah=676 nm) juga berbeda nyata ($\alpha= 95\%$) dimana nilai paling tinggi ditemui pada musim panas tahun 1999 (Su-99) dan paling rendah pada musim semi tahun 2000 (Sp-00). Nilai koefisien absorpsi dipengaruhi oleh faktor oseanografi yang berbeda setiap musim seperti angin, arus permukaan, *upwelling*, lokasi dan kecepatan *Loop Current*, dan debit air tawar dari sungai-sungai yang bermuara ke perairan timur laut Teluk Meksiko.

Kata kunci: koefisien absorpsi, musim, klorofil, CDOM, perairan Timur Laut Teluk Meksiko.

I. PENDAHULUAN

Absorpsi merupakan proses penyerapan cahaya oleh medium air, komponen terlarut berwarna (*colored dissolved organic matter* (CDOM)), partikulat (fitoplankton dan non-fitoplankton), dan bahan organik lainnya di dalam air (Babin *et al.*, 2003; D'sa and Miller, 2002; Jacobson, 2005; Kirk, 1994; Mobley, 1994; Nelson and Guarda, 1995; Varkey *et al.*, 2004). Dalam mendefinisikan absorpsi secara kuantitatif, dapat menggunakan kuantitas *absorptance* (A) yang dirumuskan sebagai berikut (Kirk, 1994; Mobley, 1994):

$$A = \Phi_a / \Phi_0 \dots\dots\dots(1)$$

dimana: A=absorptance, Φ_a = fluks radiansi yang diserap (W), Φ_0 = fluks radiansi datang (*incident*) (W).

Koefisien absorpsi menunjukkan sebagian kecil dari *incident light* (cahaya datang) yang berinteraksi dengan suatu lapisan pada medium, yang kemudian menyebabkan proses penyerapan (Jacobson, 2005; Kirk, 1994). Koefisien absorpsi sendiri didefinisikan sebagai *absorptance* (A) per satuan jarak atau ketebalan (Δr), yang secara matematik dirumuskan sebagai berikut (Mobley, 1994):

$$a(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{A(\lambda)}{\Delta r} \dots\dots\dots(2)$$

dimana: λ =panjang gelombang (nm), r= ketebalan medium (m).

Penyerapan atau absorpsi cahaya oleh medium air beserta komponennya merupakan bagian dari *inherent optical properties* (IOPs) yaitu sifat optik perairan yang hanya dipengaruhi oleh medium air dan komponen air tersebut (Jacobson, 2005; Kirk, 1994; Mobley, 1994). Secara umum, ada tiga komponen utama yang mempengaruhi sifat optik perairan yaitu fitoplankton, *nonphytoplankton particulate matter* (*detritus*), dan *colored dissolved organic matter* (CDOM) (Arnone *et al.*, 2004; Nelson and Guarda, 1995). Fitoplankton dan *nonphytoplankton*

particulate matter (*detritus*) yang disebutkan di atas, dapat dikelompokkan ke dalam *particulate matter*. Variasi kandungan *particulate matter* dan CDOM dalam kolom air akan mempengaruhi variasi absorpsi cahaya yang mengakibatkan variasi energi cahaya yang menembus kolom air tersebut.

Sifat absorpsi cahaya oleh air umumnya sangat lemah dalam spektrum warna biru dan hijau, namun penyerapannya semakin meningkat dengan semakin meningkatnya panjang gelombang dan hampir menyerap maksimal pada spektrum gelombang merah (Kirk, 1994; Mobley, 1994). Keberadaan fitoplankton yang mengandung klorofil, karotenoid, dan biliprotein dalam kolom air dapat meningkatkan tingkat absorpsi cahaya (Kirk, 1994; Jensen and Jensen, 1998). Absorpsi cahaya oleh fitoplankton umumnya tinggi pada spektrum gelombang hijau (Mobley, 1994; Kirk, 1994).

Absorpsi CDOM dan detritus maksimum pada panjang gelombang ultraviolet dan semakin menurun secara eksponensial ke arah panjang gelombang yang semakin tinggi sampai mencapai titik nol pada panjang gelombang merah (Babin *et al.*, 2003; D'sa and Miller, 2002; Markager and Vincent, 2000; Cleveland, 1995; Nelson and Guarda, 1995). Secara umum, absorpsi CDOM dan detritus cenderung lebih tinggi pada perairan pesisir dibandingkan dengan laut lepas mengingat kandungan CDOM umumnya lebih tinggi di daerah pesisir daripada laut lepas (Nelson and Guarda, 1995).

Varibilitas absorpsi dalam sebuah kolom air berpengaruh terhadap tingkat penetrasi dan atenuasi cahaya dalam kolom air yang pada akhirnya dapat mempengaruhi proses kehidupan dalam kolom air tersebut. Informasi nilai absorpsi sangat penting dalam menentukan nilai atenuasi dalam sebuah kolom air yang pada akhirnya juga dapat digunakan untuk pemodelan bio-optik dan kalibrasi/validasi satelit *ocean color* (Babin *et al.*, 2003). Informasi terkait nilai absorpsi secara kuantitatif dari permukaan air laut masih sangat terbatas baik dari perairan di

negara maju khususnya dari perairan di negara berkembang seperti Indonesia. Untuk itu, penelitian terkait variabilitas absorpsi permukaan air laut ini sangat penting dilakukan.

Teluk Meksiko terletak di sebelah selatan Amerika dan utara Meksiko, merupakan laut semi tertutup, dan menghubungkan wilayah Samudera Atlantik melalui Selat Florida di sebelah timur dan Laut Karibia melalui Selat Yucatan di sebelah selatan (Gulfbase, 2012; Oey *et al.*, 2005). Kondisi fisik dan kimia perairan Teluk Meksiko sangat bervariasi dengan masukan air tawar dari sungai dan curah hujan, serta sirkulasi massa air yang masuk melalui Selat Yucatan (bersirkulasi sebagai *Loop Current*) dan keluar melalui Selat Florida (pada akhirnya membentuk *Gulf Stream*). Bagian-bagian dari *Loop Current* sering melepaskan diri membentuk pusaran atau 'gyres' yang dapat mempengaruhi pola arus regional (Horn, 2012).

Aliran sungai, *Loop Current*, dan *upwelling* sangat mempengaruhi variabilitas konsentrasi klorofil dan *colored dissolved organic matter* (CDOM) di perairan timur laut Teluk Meksiko (Gilbes *et al.*, 1996; Nababan, 2005; Nababan *et al.*, 2011). Selain itu, perairan timur laut Teluk Meksiko memiliki karakteristik perairan yang sangat dinamis dan memiliki variabilitas perairan yang tinggi. Penelitian terkait koefisien absorpsi di perairan ini masih sedikit dilakukan sehingga penelitian terkait variabilitas koefisien absorpsi ini sangat penting dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai, distribusi,

dan variabilitas koefisien absorpsi cahaya pada permukaan air laut secara spasial dan temporal di perairan timur laut Teluk Meksiko.

II. METODE PENELITIAN

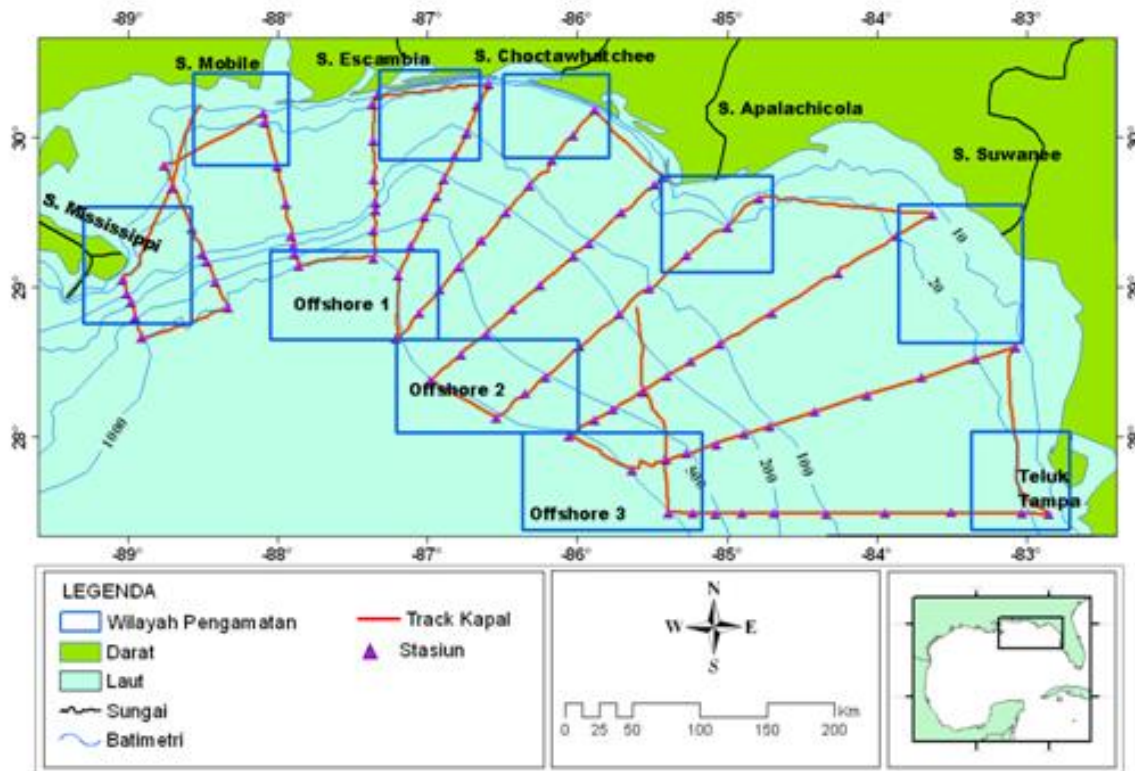
2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Pengambilan data lapangan dilakukan di perairan timur laut Teluk Meksiko (Northeastern Gulf of Mexico/NEGOM) yang membentang dari sungai Mississippi hingga Teluk Tampa (27°18'–30°42' LU dan 82°36'–89°36' BB) pada tiga musim yang berbeda (semi, panas, dan gugur) antara tahun 1999 dan 2000 (Tabel 1) hasil kerja sama antara *College of Marine Science, University of South Florida* dan *Texas A&M University* (Gambar 1). Penggunaan data hasil penelitian ini berdasarkan persetujuan dari *College of Marine Science, University of South Florida* dan *Texas A&M University*.

Disamping pengolahan data secara keseluruhan menurut lintasan kapal, beberapa lokasi tertentu (kotak warna biru dalam Gambar 1) digunakan untuk mengetahui karakteristik perairan terkait pola distribusi dan variabilitas koefisien absorpsi cahaya pada wilayah tersebut. Umumnya lokasi tersebut merupakan wilayah yang berdekatan dengan aliran sungai seperti sungai *Missisipi, Mobile, Escambia, Choctawhatchee, Apalachicola*, dan *Suwannee*. Selain itu, juga diambil lokasi di perairan laut lepas (stasiun *offshore1, 2, dan 3* pada Gambar 1).

Tabel 1. Waktu pelaksanaan survey, identitas *cruise research*, dan jenis musim.

No. <i>cruise</i>	Tanggal mulai	Tanggal selesai	<i>CruiseID</i>	Musim
1	15 Mei 1999	28 Mei 1999	Sp-99	Semi
2	15 Agustus 1999	28 Agustus 1999	Su-99	Panas
3	13 November 1999	23 November 1999	Fa-99	Gugur
4	15 April 2000	26 April 2000	Sp-00	Semi
5	28 Juli 2000	8 Agustus 2000	Su-00	Panas



Gambar 1. Peta lokasi penelitian. Garis coklat menunjukkan lintasan kapal riset dimana data AC-9 diambil secara kontinu. Segitiga ungu merupakan stasiun pengambilan data CTD dimana pada beberapa stasiun ini dilakukan proses kalibrasi dan pembersihan alat AC-9. Kota persegi warna biru merupakan lokasi pengamatan lokal.

2.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah debubbler yang bertujuan untuk menghilangkan gas-gas yang mungkin terperangkap dalam air laut saat proses pemompaan dari permukaan laut sampai ke ruang laboratorium basah di dalam kapal, GPS (Global Positioning System), instrumen AC-9 (Gambar 2), dan seperangkat komputer.

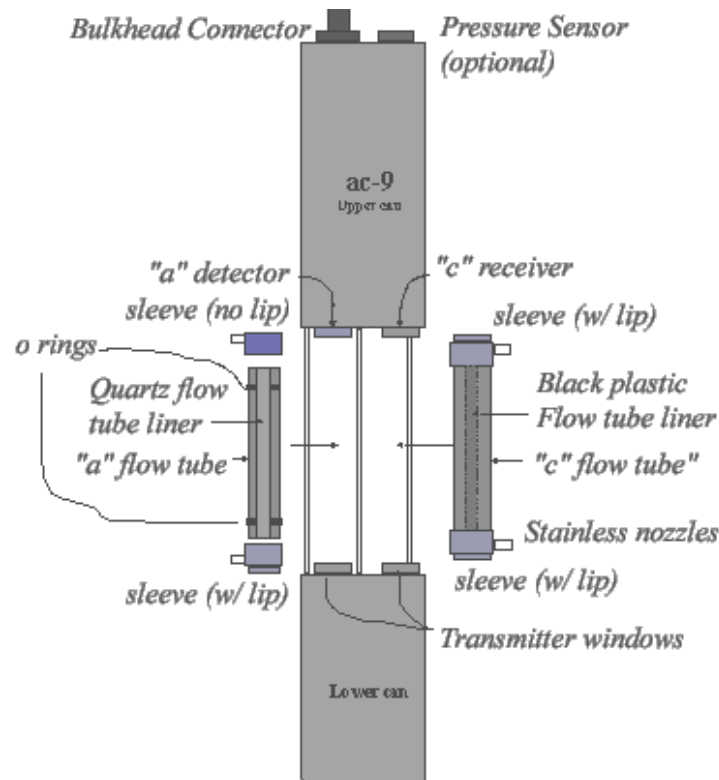
Perangkat lunak yang digunakan dalam pengolahan data diantaranya yaitu WETview, Microsoft Excel 2007, Matlab R2010a, Surfer 9, Statistica 6.0, dan Minitab 14. GPS digunakan dalam navigasi pada saat pengambilan data, sedangkan instrumen AC-9 digunakan untuk mengukur koefisien absorpsi cahaya di lapangan. Instrumen AC-9 merekam nilai absorpsi cahaya pada sembilan kanal (panjang gelombang) yaitu 412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, 676, dan 715 nm (D'sa and Miller 2002; Varkey *et al.*, 2004).

2.3. Proses Pengambilan Data

Sampel air laut dipompa secara terus menerus (*flow-through*) dari kedalaman 3 meter dari depan kapal dengan laju 10 liter/menit dan dialirkan ke debubbler ukuran 10 liter untuk menghilangkan gas-gas yang mungkin terperangkap saat proses pemompaan. Air laut dengan laju 1 liter/menit dari debubbler dialirkan ke instrumen AC-9 dan pencatatan data dilakukan secara terus menerus setiap 5 detik.

Pengambilan data mengikuti sebelas line transect yang tegak lurus terhadap garis pantai dari kedalaman 10 meter (dekat pantai) hingga 1000 meter ke arah laut lepas.

Instrumen AC-9 dikalibrasi dengan air MilliQ sebelum pengambilan data di lapangan dan pada saat pengambilan data di lapangan. Proses pembersihan tabung instrumen AC-9 juga dilakukan dengan menggunakan air MilliQ paling tidak satu kali dalam sehari.



Gambar 2. Skema instrumen AC-9 (<http://argon.coas.oregonstate.edu>, 2013).

2.4. Analisis Data

Data yang diperoleh dari pengukuran instrumen AC-9 diproses dengan perangkat lunak *WETview*. Susunan data hasil proses dari *WETview* kemudian dicocokkan dengan waktu yang tercatat dari kapal (sesuai dengan data GPS). Data ini kemudian difilter untuk menghilangkan *noise* yang mungkin timbul saat perekaman data dilakukan di lapangan.

Proses *filtering* data dilakukan terhadap hasil pengukuran pada air murni (*MilliQ*) dan hasil pengukuran lapangan dari instrumen AC-9. *Filtering* data dilakukan dengan menggunakan fungsi logika IF pada *Microsoft Excel* agar dapat menghilangkan nilai yang dianggap pencilan/menjauhi nilai pada sebaran normal. Formula yang digunakan dalam *filter* data ini menggunakan nilai batas bawah (BB) dan batas atas (BA) pada nilai sebaran untuk mengganti nilai pencilan yang menjauhi sebaran normal dengan rumus berikut:

$$F = \text{jika}(\text{nilai data} < \text{BB}, \text{BB}, \text{jika}(\text{nilai data} > \text{BA}, \text{BA}, \text{nilai data})) \dots\dots\dots (3)$$

dimana: BA=rata-rata + standar deviasi, BB=rata-rata - standar deviasi

Setelah proses *filtering* selesai, data selanjutnya dikoreksi dengan hasil pengukuran dari air murni (*MilliQ*) dan faktor hamburan (*scattering correction*). Koreksi terhadap nilai air murni (*MilliQ*) dilakukan dengan menggunakan rumus berikut (Barnard, 2011):

$$a_m = a_t - a_w \dots\dots\dots (4)$$

dimana: a_m =nilai absorpsi koefisien hasil pengukuran setelah koreksi air murni (m^{-1}), a_t =nilai absorpsi koefisien pada sampel sebelum koreksi (m^{-1}), dan a_w =nilai absorpsi koefisien pada air murni (m^{-1}).

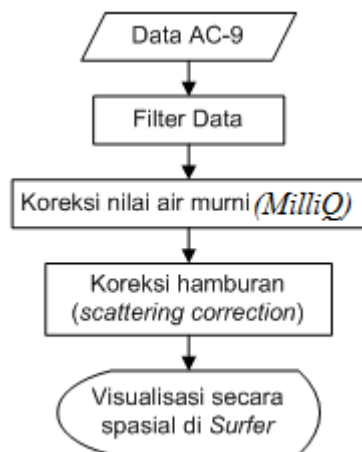
Koreksi hamburan (*scattering correction*) dilakukan mengingat tabung (*tube*) *absorption meters* pada instrumen AC-9 umumnya tidak dapat mengumpulkan semua cahaya yang terhamburkan dari sumber cahaya. Hamburan cahaya yang tidak terkumpul ini dikenal sebagai eror hamburan (*scattering error*) dan menyebabkan instru-

men mengukur koefisien absorpsi tidak sesuai dari yang semestinya (*overestimate*).

Ada beberapa metode yang dapat digunakan dalam mengoreksi pengukuran absorpsi terhadap *scattering errors*. Dalam penelitian ini, metode koreksi hamburan yang digunakan adalah metode pengurangan nilai data absorpsi terhadap nilai absorpsi pada panjang gelombang yang direferensikan (gelombang *near infrared*), dimana pada panjang gelombang ini total penyerapan diasumsikan nol dengan rumus sebagai berikut (Barnard, 2003; Bell, 2010):

$$a(\lambda) = a_m(\lambda) - a_m(\lambda_{ref}) \dots \dots \dots (5)$$

dimana: $a(\lambda)$ =nilai absorpsi koefisien hasil koreksi (*scattering correction*) (m^{-1}), $a_m(\lambda)$ = nilai absorpsi koefisien hasil pengukuran setelah koreksi air murni (m^{-1}), dan $a_m(\lambda_{ref})$ = nilai absorpsi koefisien hasil koreksi nilai air murni pada panjang gelombang *near infrared* (715 nm) (m^{-1}). Nilai $a(\lambda)$ merupakan nilai akhir yang digunakan sebagai nilai koefisien absorpsi untuk analisis statistik selanjutnya. Proses pengolahan data selengkapnya disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir pengolahan data

Deskriptif statistik digunakan dalam analisis data. Sedangkan visualisasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Surfer*. Dalam membandingkan apakah nilai rata-rata dua atau lebih peubah identik atau paling tidak

satu diantaranya berbeda nyata, dilakukan uji nonparametrik Kruskal Wallis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Variabilitas dan Distribusi Spasial Koefisien Absorpsi Cahaya

Nilai koefisien absorpsi (a) berdasarkan panjang gelombang pada semua musim, secara umum menunjukkan nilai yang semakin menurun seiring dengan meningkatnya panjang gelombangnya (412-715 nm). Hal ini terjadi karena secara umum absorpsi oleh komponen air laut itu sendiri (*particulate* dan CDOM) akan semakin menurun dengan semakin meningkatnya panjang gelombang dan mencapai 0% absorpsi pada panjang gelombang *near infrared* (715 nm) (Kirk, 1994; Mobley, 1994; Nelson and Guarda, 1995; Babin *et al.*, 2003).

Secara umum, kisaran nilai koefisien absorpsi selama penelitian pada panjang gelombang 412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, dan 676 nm berturut-turut sebagai berikut 0,0090-8,0242 m^{-1} , 0,0118-5,0707 m^{-1} , 0,0096-3,0275 m^{-1} , 0,0098-2,2476 m^{-1} , 0,0038-1,6223 m^{-1} , 0,0000-2,5382 m^{-1} , 0,0000-0,6661 m^{-1} , dan 0,0000-0,6353 m^{-1} . Dari hasil ini jelas terlihat bahwa nilai tertinggi koefisien absorpsi ditemui pada panjang gelombang 412 dan yang paling rendah ditemui pada panjang gelombang 676. Khusus pada panjang gelombang 715 nm, hasil menunjukkan bahwa koefisien absorpsi selama penelitian bernilai nol sehingga pembahasan terhadap koefisien absorpsi pada panjang gelombang ini tidak dilakukan.

Pola sebaran spasial koefisien absorpsi (a) tiap musim menunjukkan bahwa daerah sekitar pantai dan muara sungai (*nearshore*) umumnya memiliki nilai koefisien absorpsi yang relatif tinggi dibandingkan di laut lepas. Wilayah sekitar *nearshore* umumnya relatif tinggi di sekitar *run off* sungai Mississippi, Mobile, Chochawati, Escambia, Apalachicola, Suwannee, dan Tampa Bay dibandingkan nilai absorpsi koefisien yang relatif rendah di wilayah laut lepas (*offshore*)

hampir setiap musim. Variabilitas nilai absorpsi koefisien di sekitar *run off* sungai-sungai tersebut umumnya berkorelasi positif dengan variabilitas debit air dari sungai itu sendiri (Nababan, 2005; Nababan *et al.*, 2011).

3.1.1. Musim Semi

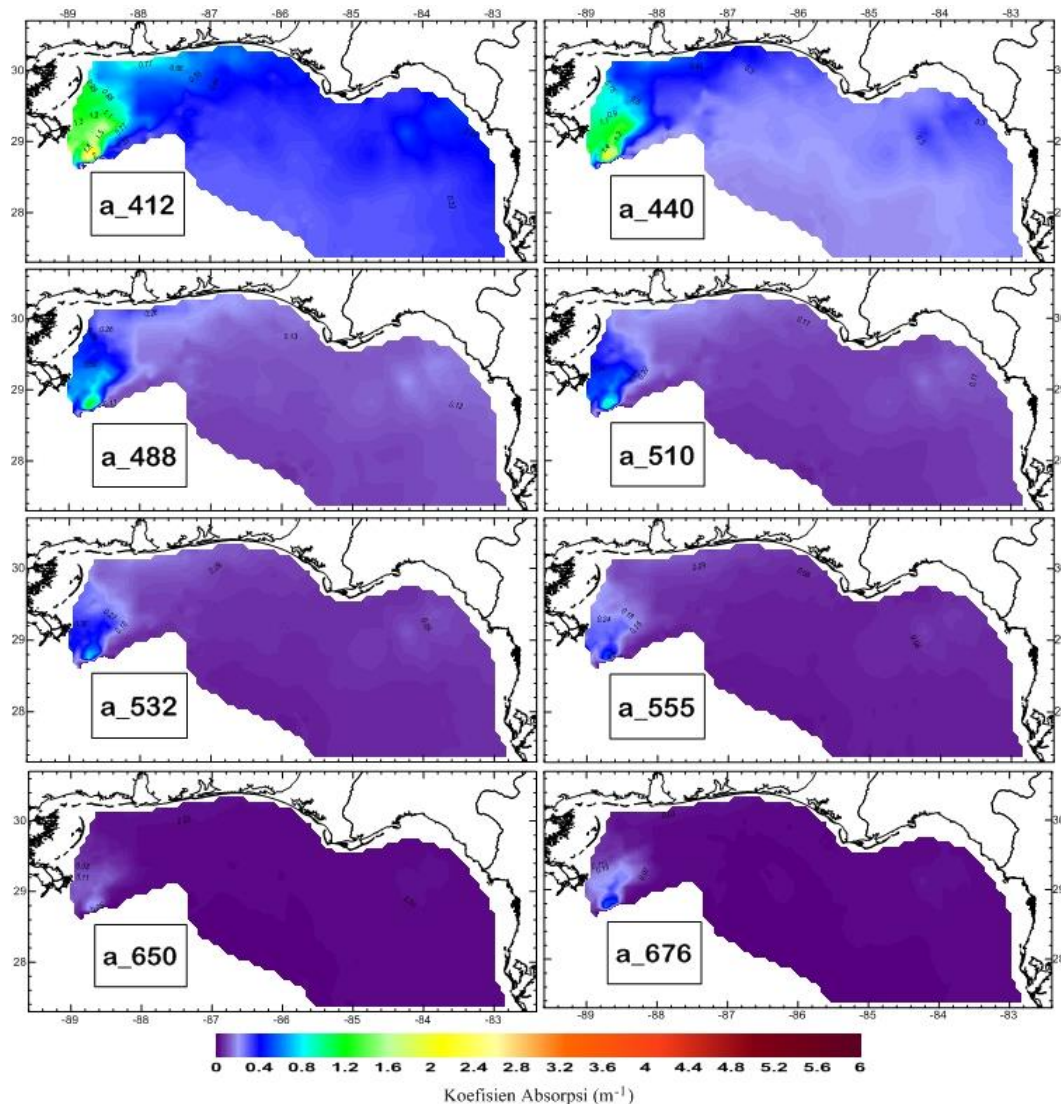
Nilai rata-rata koefisien absorpsi pada musim semi tahun 1999 pada masing-masing panjang gelombang 412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, dan 676 nm secara umum mengalami penurunan dengan nilai kisaran dari $0,4979 \pm 0,3434 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=412 \text{ nm}$) hingga $0,0213 \pm 0,0253 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=676 \text{ nm}$). Selanjutnya, pada musim semi tahun 2000, nilai rata-rata koefisien absorpsi pada masing-masing panjang gelombang tersebut diatas mengalami penurunan dengan nilai kisaran dari $0,1059 \pm 0,1546 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=412 \text{ nm}$) hingga $0,0153 \pm 0,0110 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=676 \text{ nm}$).

Perbedaan nilai koefisien absorpsi antar kedua tahun tersebut disebabkan karena perbedaan waktu pengambilan sampel meskipun pada musim yang sama. Pada musim semi tahun 1999 pengambilan sampel dilakukan mulai pertengahan sampai akhir bulan Mei (15-28 Mei 1999) yang sudah mendekati musim panas. Sedangkan musim semi tahun 2000, pengambilan sampel dilakukan pada pertengahan sampai akhir bulan April (15-28 April 2000). Arah arus laut permukaan pada akhir bulan Mei di sekitar daerah *run off* sungai Mississippi sudah berbalik arah yang sebelumnya mengarah ke arah barat menjadi ke arah timur atau tenggara yang mengakibatkan sebaran air tawar dari sungai Mississippi yang membawa banyak partikulat dan CDOM menjadi mengarah ke arah timur dan tenggara (Nababan *et al.*, 2011; Belabbassi *et al.*, 2005). Faktor lain yang mengakibatkan perbedaan nilai koefisien absorpsi ini adalah jumlah debit air tawar yang masuk dari sungai Mobile, Apalachicola, dan Suwannee pada musim semi tahun 1999 lebih tinggi dibandingkan pada musim semi tahun 2000 (Nababan, 2005). Kedua faktor inilah yang mengakibatkan nilai koefi-

sien absorpsi pada musim semi tahun 1999 di daerah *run off* sungai Mississippi, Mobile, Chochawati, Escambia, Apalachicola, Suwannee, dan Tampa Bay lebih tinggi dibandingkan dengan nilai koefisien absorpsi pada musim semi tahun 2000.

Sebagai akibat dari perbedaan arah arus laut permukaan dan debit air tawar dari beberapa sungai yang bermuara ke daerah pesisir di sekitar timur laut Gulf of Mexico pada musim semi 1999 (akhir bulan April 1999) vs. musim semi 2000 (akhir bulan Mei 2000), pola sebaran spasial koefisien absorpsi (a) pada panjang gelombang 412 nm hingga 676 nm pada musim semi tahun 1999 (15-28 Mei 1999) dan musim semi tahun 2000 (15-28 Mei 2000) menunjukkan pola spasial yang berbeda. Secara umum, nilai koefisien absorpsi untuk setiap panjang gelombang pada musim semi tahun 1999 (Gambar 4) lebih tinggi dibandingkan pada musim semi 2000 (Gambar 5) di sekitar *run off* sungai Mississippi, Mobile, Chochawati, Escambia, Apalachicola, Suwannee, dan Tampa Bay. Pada Gambar 4 terlihat dengan jelas bahwa penyebaran koefisien absorpsi yang lebih tinggi berawal dari *run off* sungai Mississippi dan menyebar ke arah timur dan hal ini secara nyata terlihat pada panjang gelombang 412 nm dan 440 nm. Pada panjang gelombang lainnya yaitu 488, 510, 532, 555, 650, dan 676 nm masih terlihat dengan jelas sebaran koefisien absorpsi yang berawal dari *run off* sungai Mississippi menuju ke arah timur. Relatif tingginya nilai koefisien absorpsi pada panjang gelombang ini diakibatkan oleh tingginya materi partikulat dan CDOM yang dibawa oleh *run off* sungai Mississippi ke lokasi ini (Nababan, 2005; Nababan *et al.*, 2011).

Debit air tawar dari sungai Mississippi sangat mempengaruhi variabilitas dan distribusi partikulat, klorofil, CDOM, dan nutrisi ke laut lepas (*offshore*) setiap musimnya. Berbeda dengan wilayah Mississippi, semakin ke arah timur, nilai koefisien absorpsi di wilayah timur semakin rendah. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa perobahan



Gambar 4. Pola distribusi spasial koefisien absorpsi pada musim semi tahun 1999 (Sp-99).

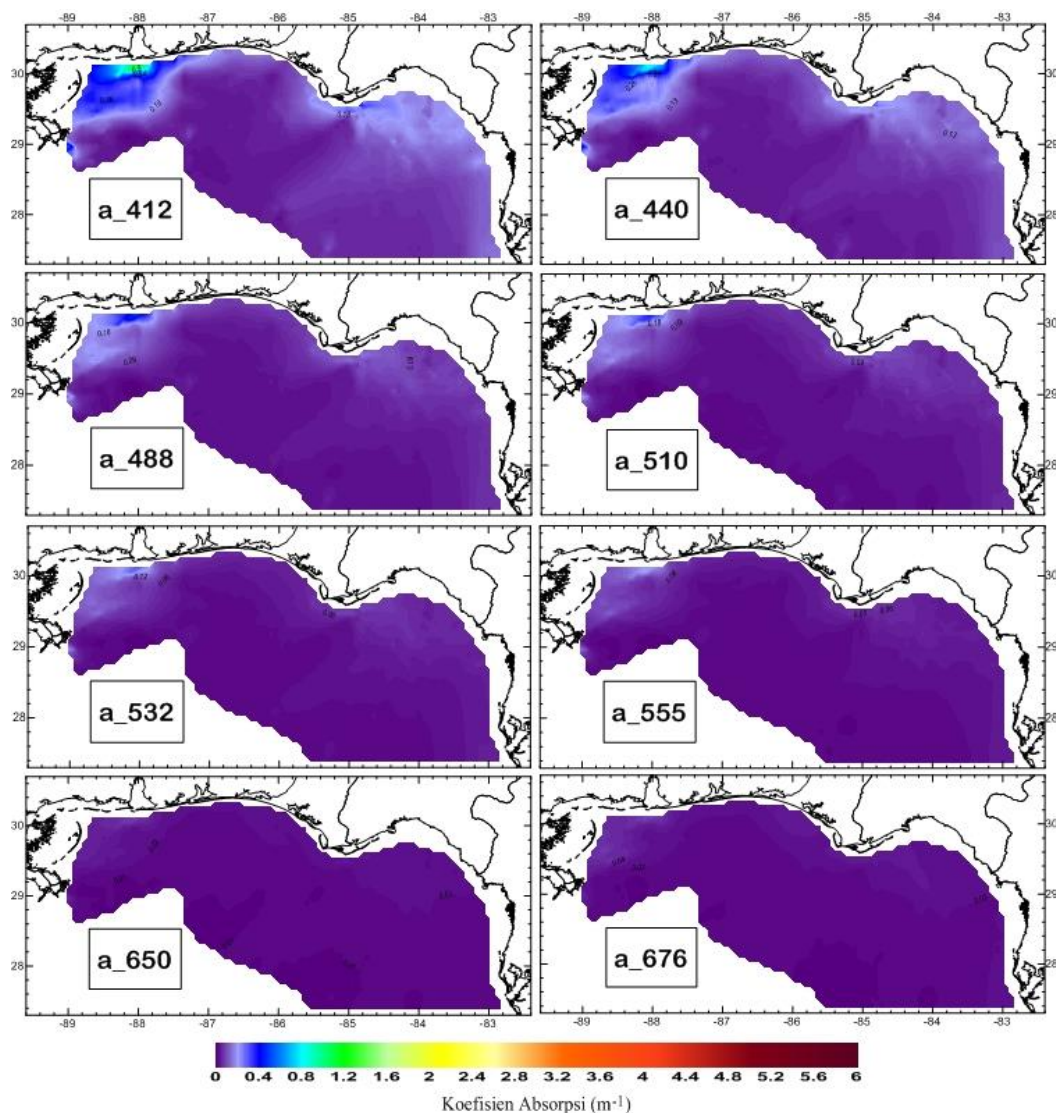
arah arus pada akhir musim semi yang sebelumnya mengarah ke barat menjadi ke arah timur sebagai faktor penyebab relative tingginya konsentrasi klorofil dan CDOM di daerah ini pada akhir musim semi tahun 1999 dibandingkan musim semi tahun 2000 (Nababan, 2005; Nababan *et al.*, 2011).

3.1.2. Musim Panas

Nilai rata-rata koefisien absorpsi pada musim panas tahun 1999 pada masing-masing panjang gelombang secara umum mengalami penurunan dengan nilai kisaran dari $0,6887 \pm 0,1733 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=412 \text{ nm}$) hingga $0,0140 \pm 0,0157 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=676 \text{ nm}$). Selanjutnya, pada

musim panas tahun 2000, nilai rata-rata koefisien absorpsi pada masing-masing panjang gelombang tersebut mengalami penurunan dengan nilai kisaran dari $0,1840 \pm 0,2150 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=412 \text{ nm}$) hingga $0,0133 \pm 0,0210 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=676 \text{ nm}$). Rata-rata nilai koefisien absorpsi pada kedua musim ini secara umum tidak berbeda nyata. Contoh sebaran spasial nilai koefisien absorpsi setiap panjang gelombang pada musim semi 1999 disajikan pada Gambar 6.

Pola sebaran koefisien absorpsi pada musim panas tahun 1999 dan musim panas tahun 2000 menunjukkan nilai yang semakin rendah dengan semakin naiknya panjang

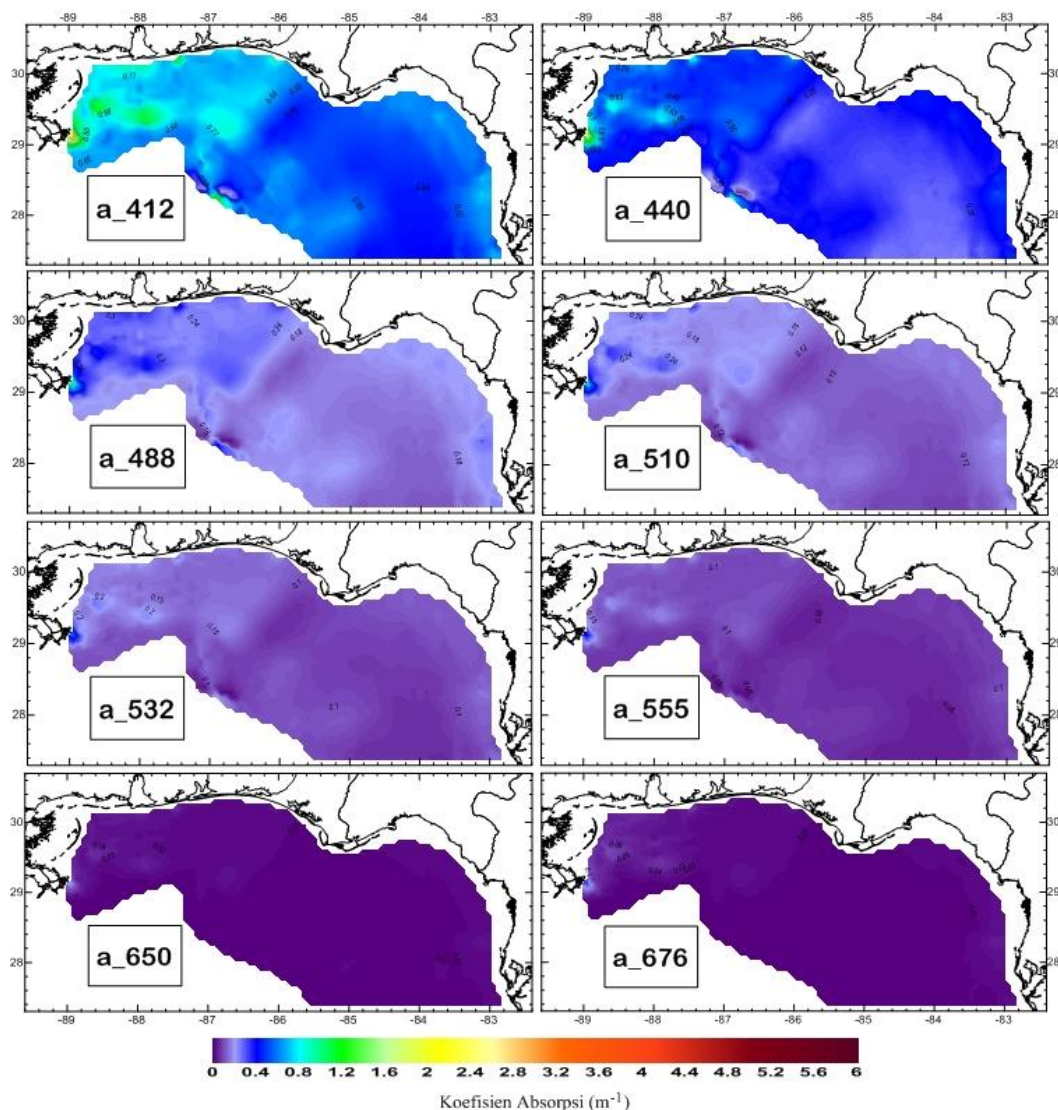


Gambar 5. Pola distribusi spasial koefisien absorpsi pada musim semi tahun 2000 (Sp-00).

gelombang (412 nm hingga 676 nm) dan memiliki pola sebaran yang relatif sama pada kedua musim di setiap panjang gelombang. Koefisien absorpsi pada musim panas umumnya memiliki nilai yang relatif paling tinggi di daerah sekitar Sungai Mississippi, Mobile, Escambia, Choctawatchee, dan sebagian wilayah pada laut lepas (*offshore* 1), sedangkan di wilayah lainnya relatif lebih rendah. Pergerakan angin, arus, maupun *upwelling* sepanjang musim panas mempengaruhi keluaran (nutrien) dari sungai Mississippi sehingga menyebar dan bergerak ke arah timur, serta dapat menyebar hingga ke arah laut lepas. Kondisi perairan tersebut menyebabkan pergerakan partikulat, klorofil, dan CDOM

yang relatif lebih tinggi ke arah laut lepas dibandingkan pada musim lainnya menyebabkan nilai koefisien absorpsi menjadi relatif lebih tinggi di wilayah Mississippi, Mobile, Escambia, Choctawatchee, dan sebagian wilayah laut lepas (*offshore*) (Nababan, 2005; Nababan *et al.*, 2011).

Nilai koefisien absorpsi yang terlihat relatif tinggi di daerah *offshore* timur laut Teluk Meksiko mulai pada panjang gelombang 412 nm sampai dengan panjang gelombang 555 nm menunjukkan bahwa di daerah *offshore* ini terdapat konsentrasi klorofil dan CDOM yang relative lebih tinggi disbandingkan pada musim lainnya. *Blooming* fitoplankton yang terjadi di sekitar *offshore* ini,



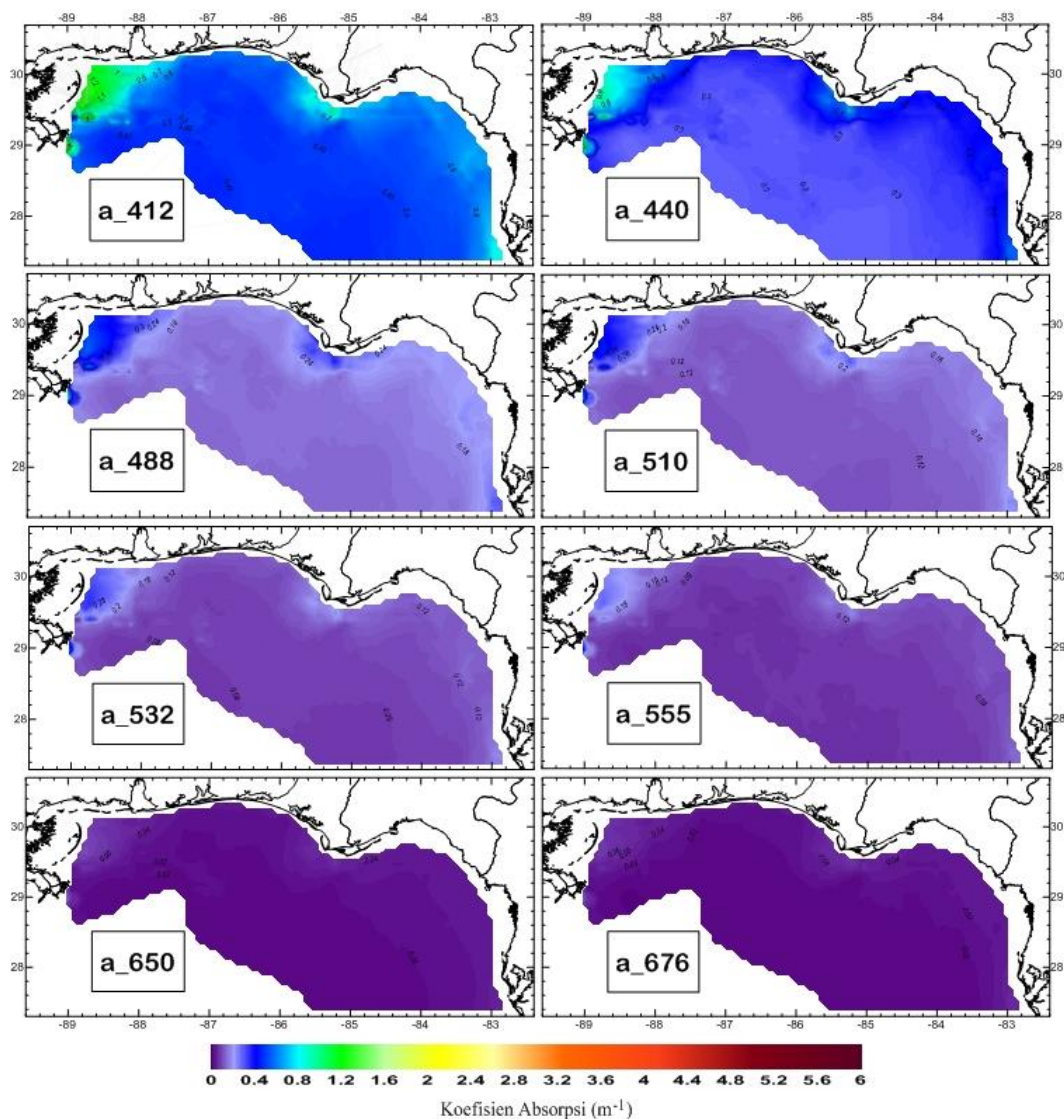
Gambar 6. Pola distribusi spasial koefisien absorpsi pada musim panas tahun 1999 (Su-99).

terjadi karena pengaruh sirkulasi permukaan akibat pengaruh angin dan arus yang bergerak dari sekitar Mississippi ke arah timur hingga tenggara (east-southeastward: ESE) pada musim panas yang membawa kandungan nutrient, fitoplankton, dan CDOM hingga mencapai wilayah offshore (Belabbassi *et al.*, 2005; Nababan, 2005; Nababan *et al.*, 2011).

3.1.3. Musim Gugur

Nilai rata-rata koefisien absorpsi pada musim gugur tahun 1999 pada masing-masing panjang gelombang (412 hingga 676 nm) secara umum mengalami penurunan dengan nilai kisaran dari $0,5686 \pm 0,2318 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=412 \text{ nm}$) hingga $0,0228 \pm 0,0174 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=676 \text{ nm}$).

Pola sebaran koefisien absorpsi pada musim gugur menunjukkan bahwa secara umum hanya panjang gelombang 412 dan 440 nm yang memiliki nilai koefisien absorpsi yang relatif tinggi di sekitar Sungai Mississippi, Mobile, Apalachicola, Suwannee, dan Teluk Tampa, sedangkan wilayah lainnya bernilai relatif lebih rendah (Gambar 7). Koefisien absorpsi yang relatif tinggi di sekitar sungai Mississippi, Mobile, Apalachicola, Suwannee, dan Teluk Tampa dan hanya pada panjang gelombang 412 dan 440 nm, diduga terjadi karena pengaruh konsentrasi klorofil dan CDOM yang relatif lebih tinggi pada daerah ini dibandingkan daerah *offshore* (Nababan, 2005; Nababan *et al.*, 2011). Nilai



Gambar 7. Pola distribusi spasial koefisien absorpsi pada musim gugur tahun 1999 (Fa-99).

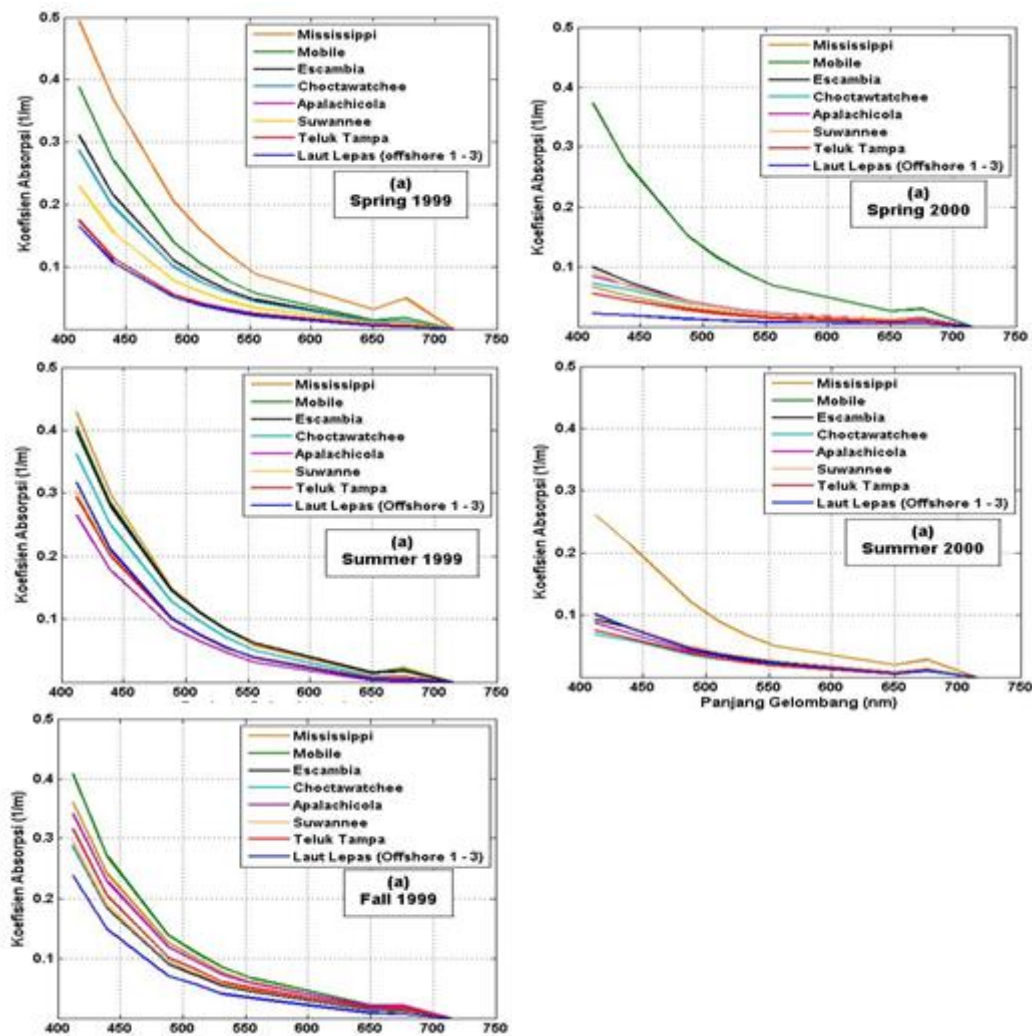
koefisien absorpsi yang relatif rendah pada panjang gelombang 448, 510, 532, 555, 650, dan 676 nm pada perairan timur laut Teluk Meksiko pada musim gugur ini menunjukkan bahwa pada musim gugur kandungan klorofil secara umum adalah rendah dibandingkan pada musim lainnya.

3.2. Variabilitas Koefisien Absorpsi Cahaya antar Wilayah

Nilai rata-rata koefisien absorpsi pada lima musim pengamatan secara umum paling tinggi ditemui di daerah *run off* sungai Mississippi, kecuali pada musim gugur 1999 (Fa-99) dan musim semi 2000 (Sp-00) nilai

rata-rata koefisien absorpsi paling tinggi ditemui di lokasi sekitar *run off* sungai Mobile (Gambar 8). Hal ini menunjukkan bahwa bahan penyerap cahaya seperti bahan organik dan fitoplankton secara umum lebih banyak ditemukan di daerah *run off* sungai Mississippi dibandingkan daerah lain. Hasil pengamatan ini juga sesuai dengan hasil penelitian Nababan (2005; 2009) dan Nababan *et al.* (2011).

Secara umum nilai rata-rata koefisien absorpsi paling rendah ditemui pada daerah laut lepas (*Offshore* 1-3) kecuali pada musim panas 1999 (Su-99) dan 2000 (Su-00) (Gambar 8).



Gambar 8. Perbandingan spektral nilai rata-rata koefisien absorpsi per wilayah tiap musim.

Relatif tingginya koefisien absorpsi di daerah laut lepas (*offshore* 1-3) pada musim panas tahun 1999 (Su-99) dan tahun 2000 (Su-00) diduga karena pengaruh tranpor nutrisi dari sekitar muara Sungai Mississippi ke arah timur dan tenggara akibat pengaruh pergerakan arus (*Loop Current*) (Nababan, 2005), sehingga menyebabkan terbawanya kandungan materi partikulat ke arah laut lepas.

Apabila membandingkan nilai rata-rata koefisien antar musim pada tiga golongan panjang gelombang (440 nm=gelombang biru, 510 nm=gelombang hijau, 676 nm=gelombang merah), terlihat bahwa koefisien absorpsi berbeda nyata antar musim pada setiap panjang gelombang (Tabel 2). Pada panjang

gelombang 440 nm, nilai rata-rata koefisien absorpsi maksimum ditemui pada musim panas tahun 1999 (Su-99) dengan nilai sebesar $0,4640 \pm 0,1347 \text{ m}^{-1}$ dan nilai minimum ditemui pada musim semi tahun 2000 (Sp-00) dengan nilai rata-rata koefisien absorpsi sebesar $0,0837 \pm 0,1134 \text{ m}^{-1}$. Pada panjang gelombang 510 nm, nilai rata-rata koefisien absorpsi maksimum ditemui pada musim panas tahun 1999 (Su-99) dengan nilai sebesar $0,1748 \pm 0,0588 \text{ m}^{-1}$ dan nilai minimum ditemui pada musim semi tahun 2000 (Sp-00) dengan nilai sebesar $0,0421 \pm 0,0513 \text{ m}^{-1}$. Pada panjang gelombang 676 nm, nilai rata-rata koefisien absorpsi maksimum ditemui pada musim semi tahun 1999 (Sp-99) dengan

Tabel 2. Perbandingan nilai rata-rata koefisien absorpsi cahaya antar musim pada panjang gelombang 440, 510, dan 676 nm.

Musim	Koefisien Absorpsi (m^{-1})		
	440 nm	510 nm	676 nm
Semi 1999	$0,3417 \pm 0,2651^a$	$0,1340 \pm 0,1174^a$	$0,0254 \pm 0,0436^a$
Panas 1999	$0,4640 \pm 0,1347^b$	$0,1748 \pm 0,0588^b$	$0,0171 \pm 0,0256^b$
Gugur 1999	$0,3644 \pm 0,1740^c$	$0,1467 \pm 0,0844^c$	$0,0228 \pm 0,0174^c$
Semi 2000	$0,0837 \pm 0,1134^d$	$0,0421 \pm 0,0513^d$	$0,0174 \pm 0,0133^d$
Panas 2000	$0,1494 \pm 0,1561^e$	$0,0692 \pm 0,0683^e$	$0,0212 \pm 0,0280^e$

Keterangan: simbol superscript a, b, c, d, dan e menandakan bahwa nilai antar musim berbeda nyata pada taraf 95% dengan uji Kruskal-Wallis.

nilai sebesar $0,0254 \pm 0,0436 \text{ m}^{-1}$ dan nilai minimum ditemui pada musim panas tahun 1999 (Su-99) dengan nilai sebesar $0,0171 \pm 0,0256 \text{ m}^{-1}$ (Tabel 2). Relatif tingginya rata-rata koefisien absorpsi pada musim panas tahun 1999 (Su-99), mengindikasikan bahwa konsentrasi dan variabilitas klorofil, CDOM, dan materi partikulat lainnya sangat tinggi pada musim ini dibandingkan pada musim lainnya. Ditemukannya perbedaan nyata pada nilai rata-rata koefisien absorpsi antar musim pada tiga kategori panjang gelombang menunjukkan adanya faktor-faktor fisik lainnya seperti angin, arus permukaan, upwelling, dan lokasi Loop Current yang ikut mempengaruhi jumlah dan penyebaran konsentrasi klorofil, CDOM, dan partikulat lainnya di perairan timur laut Teluk Meksiko.

IV. KESIMPULAN

Pola sebaran spasial nilai koefisien absorpsi (a) pada tiga musim menunjukkan bahwa daerah sekitar pantai dan muara sungai (*nearshore*) secara umum memiliki nilai yang relatif lebih tinggi dibandingkan di laut lepas. Akan tetapi, nilai koefisien absorpsi pada musim panas (Su-99 dan Su-00) yang relatif tinggi juga menyebar hingga laut lepas (*offshore*). Hasil ini mengikuti pola sebaran spasial konsentrasi klorofil dan CDOM yang sebelumnya diteliti penulis. Berdasarkan hasil perbandingan spektral nilai rata-rata koefisien absorpsi antar wilayah lokal pengamatan

ditemukan perbedaan yang nyata ($\alpha=95\%$) dimana nilai rata-rata koefisien absorpsi paling tinggi ditemui di wilayah *run off* sungai Mississippi dan Mobile dan paling rendah di daerah laut lepas (*offshore*) kecuali pada musim panas dimana nilai koefisien absorpsi yang relatif lebih tinggi juga ditemukan di laut lepas (*offshore*).

Secara umum, kisaran nilai koefisien absorpsi pada panjang gelombang 412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, dan 676 berturut-turut adalah sebagai berikut $0,0090\text{--}8,0242 \text{ m}^{-1}$, $0,0118\text{--}5,0707 \text{ m}^{-1}$, $0,0096\text{--}3,0275 \text{ m}^{-1}$, $0,0098\text{--}2,2476 \text{ m}^{-1}$, $0,0038\text{--}1,6223 \text{ m}^{-1}$, $0,00001\text{--}2,5382 \text{ m}^{-1}$, $0,00003\text{--}0,6661 \text{ m}^{-1}$, dan $0,000002\text{--}0,6353 \text{ m}^{-1}$.

Perbandingan spektral nilai rata-rata koefisien absorpsi antar musim pada tiga panjang gelombang utama (biru=440 nm, hijau=510 nm, dan merah=676 nm) menunjukkan perbedaan yang nyata ($\alpha=95\%$) dimana spektral nilai rata-rata koefisien absorpsi paling tinggi ditemui pada musim panas tahun 1999 (Su-99) dan paling rendah pada musim semi tahun 2000 (Sp-00). Hasil ini menunjukkan bahwa nilai koefisien absorpsi sangat dipengaruhi oleh faktor oseanografi yang berbeda setiap musim di perairan ini seperti seperti angin, arus permukaan, *upwelling*, lokasi dan kecepatan *Loop Current*, dan debit air tawar dari sungai-sungai yang bermuara ke perairan timur laut Teluk Meksiko. Perbedaan faktor oseanografi setiap musim ini juga mempengaruhi sebaran

konsentrasi dan variabilitas partikulat, CDOM, klorofil, dan bahan organik lainnya yang secara langsung mempengaruhi variabilitas nilai koefisien absorpsi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. F.E. Muller Karger dan Prof. Dr. Chuanmin Hu dari College of Marine Science, University of South Florida atas bantuannya untuk memfasilitasi pengambilan dan penggunaan data dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Prof. Dr N.L. Guinasso sebagai *Co-Chief Scientist for the NEGOM-COH field work on the R/V Gyre* yang telah memberikan tempat bagi penulis untuk berpartisipasi dalam penelitian NEGOM-COH tersebut. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Kapten dan semua *crew R/V Gyre* yang telah membantu pengambilan data penelitian ini. Tidak lupa kami mengucapkan terima kasih kepada mitra bebestari yang telah memberi masukan untuk meningkatkan kualitas tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Arnone, R.A., A.M. Wood, and R.W. Gould Jr. 2004. The evolution of optical water mass classification. *Oceanogr. Soc.*, 17(2):14-15.
- Babin, M., D. Stramski, G.M. Ferrari, H. Claustre, A. Bricaud, G. Obolensky, and N. Hoepffner. 2003. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, dan dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *J. Geophys. Res.*, 108(C7):3211.
- Barnard, A. 2003. IOP tutorial-primary data processing. <http://www.wetlabs.com>. [Diacu: 19 Oktober 2015].
- Barnard, A. 2011. AC meter protocol document. <http://www.wetlabs.com>. [Diacu: 19 Oktober 2015].
- Belabassi, L., P. Chapman, W.D. Nowlin, Jr., A.E. Jochens, and D.C. Biggs. 2005. Summertime nutrient supply to near-surface waters of the northeastern Gulf of Mexico: 1998, 1999, and 2000. *Gulf of Mexico Science*, 23(2):137-160.
- Bell, J. 2010. Compass, host software for acs/ac9 meters. <http://www.wetlabs.com>. [Diacu: 20 Oktober 2015].
- Cleveland, J.S. 1995. Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll a concentration. *J. Geophys. Res.*, 100(C7):13,333-13,344.
- D'sa, E.J. and R.L. Miller. 2002. Bio-optical properties in water influenced by the Mississippi river during low flow conditions. *Rem. Sens. Environm.*, 84: 538-549.
- Gilbes, F., C. Tomas, J.J. Walsh, and F.E. Muller-Karger. 1996. An episodic chlorophyll-a plume on the West Florida Shelf. *Continental Shelf Research*, 16:1201-1224.
- Gulfbase. 2012. General facts about the Gulf of Mexico. <http://www.gulfbase.org/facts.php>. [Diacu: 25 Oktober 2015].
- Horn, M. 2012. Florida, gulf of mexico textbook. <http://www.mikehorn.com/en/yep/pangaea-classroom-club/chapter-2-gulf-of-mexico-textbook1/>. [Diacu: 20 Oktober 2015].
- Jacobson, E.C. 2005. Light attenuation in a nearshore coral reef ecosystems. [Thesis]. University of Hawaii. Hawaii. 50p.
- Jensen, D.K. and K.J. Jensen. 1998. Light attenuation and photosynthesis of aquatic plant communities. *Limnol. Oceanogr.*, 43(3):396-407.
- Kirk, J.T.O. 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 2nd ed. Cambridge University Press. New York. 509p.
- Markager, S. and W.F. Vincent. 2000. Spectral light attenuation and the absorption of uv and blue light in natural

- waters. *Limnol. Oceanogr.*, 45(3):642-650.
- Mobley, C.D. 1994. Light and water: radiative transfer in natural waters. Academic Press, Inc. San Diego. 579p.
- Nababan, B. 2005. Bio-optical variability of surface waters in the northeastern Gulf of Mexico [Disertation]. University of South Florida. Florida. 159p.
- Nababan, B. 2009. Chlorophyll specific absorption coefficients and the impact of phytoplankton taxonomic group of surface waters in the northeastern Gulf of Mexico. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 1(1):9-23.
- Nababan, B., F.E. Muller-Karger, C. Hu, and D.C. Biggs. 2011. Chlorophyll variability in the northeastern gulf of mexico. *Int. J. of Rem. Sens.*, 32(23): 8,373-8,391.
- Nelson, J.R. dan S. Guarda. 1995. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States. *J. Geophys. Res.*, 100(C5):8715-8732.
- Oey, L.Y., T. Ezer, and H.C. Lee. 2005. Loop current, rings and related circulation in the Gulf of Mexico: a review of numerical models and future challenges. Princeton University. New Jersey. 26p.
- Varkey, G., T. Suresh, S.G.P. Matondkar, E. Desa, and S.S. Kamath. 2004. Suspended sediment profiles derived from spectral attenuation coefficients measurements using neural network method. 3rd Indian National Conference on Harbour Ocean Engineering; 7-9 Desember 2004.

Diterima : 15 Oktober 2015

Direview : 27 November 2015

Disetujui : 30 Desember 2015